

© *Е.В. Шишкина, О.А. Чикова*  
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
г. Екатеринбург

© *А.Н. Петрова, И.Г. Бродова*  
Институт физики металлов УрО РАН,  
г. Екатеринбург

© *О.А. Чикова, Н.В. Храмова*  
Уральский государственный педагогический университет,  
г. Екатеринбург  
*chik63@mail.ru*

## **ИЗМЕРЕНИЕ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ МОДУЛЯ ЮНГА И ТВЕРДОСТИ СУБМИКРОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВОВ АМЦ И В95, ПОЛУЧЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИМ ПРЕССОВАНИЕМ**

Алюминиевые сплавы В95 (Al-6 %Zn-2 %-1,6 %Mg-2 %Cu) и АМц (Al-1,6 %Mn-0,7 %Fe-0,6 %Si) широко применяются в промышленности в качестве конструкционных материалов. С целью повышения уровня механических свойств данные материалы подвергаются интенсивной пластической деформации со скоростью порядка  $10^5 \text{ с}^{-1}$  с помощью импульсных источников. Механические свойства таких материалов определяются не только наличием субмикроструктурной структуры, но и механическими свойствами отдельных кристаллитов. Авторы провели измерение модуля Юнга и твердости субмикроструктурных сплавов В95 и АМц с различным типом структуры, полученных динамическим прессованием, методом наномеханического тестирования.

Измерения проводили с помощью наносклерометрического модуля зондовой нанолaborатории NTEGRA. Опыты проводили в условиях непрерывного нагружения линейно нарастающей во времени нагрузкой до 1 мН при комнатной температуре. Поверхность образцов сначала полировали механически, а затем электрохимически до высоты неровностей ~10 нм. Минимальный размер участка для измерений составляет порядка 200 нм. Модуль Юнга и твердость субмикроструктурных сплавов определялись в результате 50 измерений. Обработка и анализ полученных СЗМ-изображений проводились с помощью программных средств Nova (НТ-МДТ, Зеленоград, Россия) и SPIP (Image Metrology, Дания). Калибровка наносклерометрического модуля осуществлялась по пластине, изготовленной из плавленого кварца, с известными значениями модуля Юнга и твердости. При проведении эксперимента применялся зондовый

датчик типа SPM Probe NSC15/AIBS (Tip radius < 10 nm), в качестве рабочей части которого используется алмазная призма Берковича. Отпечатки индентора измерялись по результатам пк-СЗМ (полуконтактной СЗМ). Измерения проводились в ЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ.

Сплав В95 имеет структуру состоящую из  $\alpha$ -твердого раствора и вторичных включений упрочняющей фазы  $MgZn_2$ . Результаты измерения твердости исследованных образцов НМ свидетельствует о том, что однократное применение ДКУП приводит к незначительному понижению значений НМ (на 2 %) с существенным увеличением дисперсии  $S_E$  (практически на 40 %). Повторное применение ДКУП вызывает повышение значений НМ на 6 % с увеличением дисперсии  $S_E$  на 16 % по отношению к реперу. Из сравнения сгруппированных выборок значений модуля Юнга субмикрорекристаллитов сплава В95 можно заключить, что применение ДКУП приводит к появлению в микроструктуре субмикрорекристаллов с повышенным (до значений 100–110 ГПа) модулем Юнга  $E$  (рис. 1, *а*, рис. 1, *б*). Повторное применение ДКУП к образцу приводит к формированию в микроструктуре сплава зерен с пониженным относительно исходного образца значением модуля Юнга  $E$  – 50 ГПа (рис. 1, *в*). Среднее значение модуля Юнга в первом случае возрастает от 73 ГПа до 84 ГПа и дисперсии  $S_E$  от 37 до 62 (табл. 1). Во втором случае, когда применяют повторное ДКУП, среднее значение модуля Юнга уменьшается до 63 ГПа, дисперсия  $S_E$  до 43 (табл. 1).

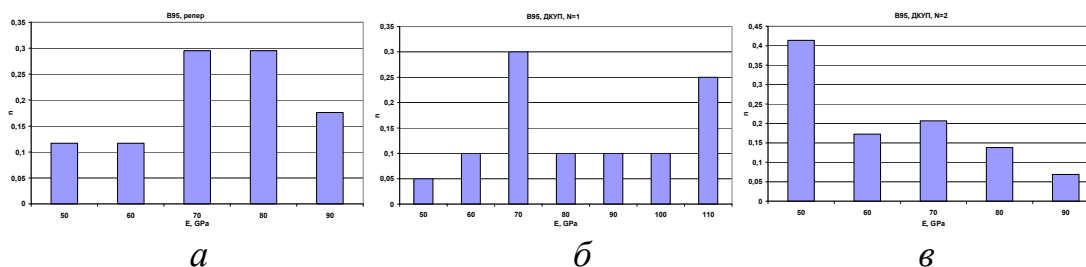


Рис. 1. Сгруппированные выборки для наблюдавшихся в опыте значений модуля Юнга  $E$  (ГПа): *а* – исходный образец; *б* – 1 проход ДКУП,  $V = 150$  м/с; *в* – 2 прохода ДКУП,  $V = 150$  м/с

Таблица 1

Механические свойства субмикрорекристаллитов сплава В95

Степень деформации	Размер зерна (данные СЗМ), мкм	$\sigma_T$ , ГПа	$\delta$ , %	$R_{\max}$ , %	$E$ , ГПа	НМ, ГПа	НМ/ $E$	$S_E$	$S_H$
Репер	Более 5	7	83	12	73	4,185	0,057	37	0,003
ДКУП, 1 проход, 150 м/с	Порядка 0,5	12,5	69	24	84	4,082	0,049	62	0,003
ДКУП, 2 прохода, 150 м/с	Порядка 0,5	22,5	80	13	63	4,450	0,071	43	0,003

Сплав АМц имеет структуру состоящую из  $\alpha$ -твердого раствора Мп в Аl и вторичных выделений  $MnAl_6$ ; в присутствии железа образуется сложная практически нерастворимая в алюминии фаза  $Al_6(MnFe)$ .

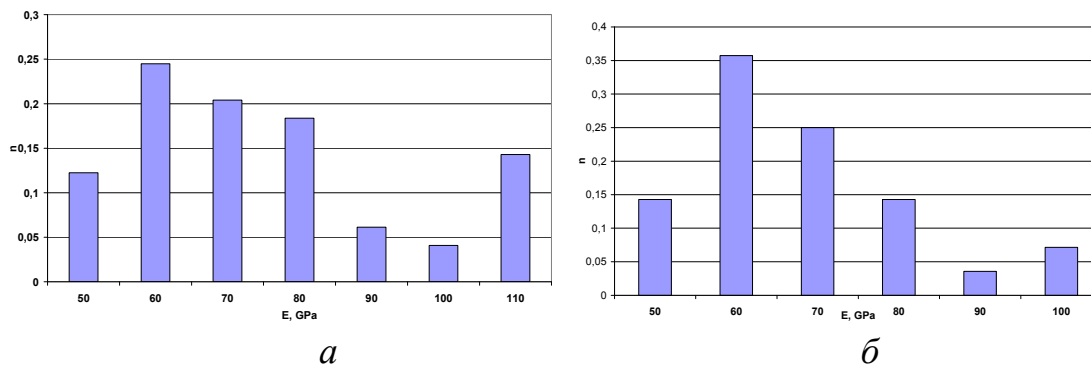


Рис. 2. Гистограммы распределения значений модуля Юнга Е (ГПа):  
а – 1 проход ДКУП, V = 150 м/с; б – 4 прохода ДКУП, V = 300 м/с

Из сравнения сгруппированных выборок для исследованных образцов сплава АМц можно заключить, что повышение степени ДКУП приводит к уменьшению удельного количества субмикрокристаллов с повышенным (до значений 100–110 ГПа) модулем Юнга Е (рис. 2). Среднее значение модуля Юнга при этом возрастает от 59 ГПа до 68 ГПа, а дисперсия  $S_E$  уменьшается от 40 до 22.

Таблица 2  
Механические свойства субмикрокристаллитов сплава АМц

Степень деформации	Размер зерна (данные СЗМ), мкм	R <sub>макс</sub> , %	Е, ГПа	Н, ГПа	S <sub>E</sub>	S <sub>H</sub>
ДКУП, 1 проход, 150м/с	Порядка 0,5	20	59	4,450	40	0,004
ДКУП, 4 прохода, 300 м/с	Порядка 0,5	16	68	6,715	22	0,072

Значения нанотвердости для образца деформированного при режиме N = 1, V = 150 м/с попадают в широкий интервал 4,6–9,8 ГПа, дисперсия нанотвердости в этом случае составляет  $S^2 = 0,07 \text{ ГПа}^2$ , что говорит о неравномерности распределения дефектов в разных кристаллах, которая подтверждается результатами ПЭМ исследований, описанными выше. Интервал значений образца деформированного при режиме N = 4, V = 300 м/с ГПа сужается и сдвигается в область меньших значений, дисперсия составляет  $S^2 = 0,004 \text{ ГПа}^2$ , у гистограммы появляется четко выраженный пик, соответствующий среднему значению нанотвердости 4,45 ГПа (табл. 2). Таким образом, величина наклепа в образце с рекристаллизованной структурой ниже и дефекты расположены более равномерно.